

A SZTE MÉRNÖKI KAR FOLYAMATMÉRNÖKI INTÉZETÉBEN FOLYÓ MIKROHULLÁMÚ SZENNYVÍZISZAP-KEZELÉS EREDMÉNYEI

Beszédes Sándor, Keszthelyi-Szabó Gábor

Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Folyamatmérnöki Intézet
H-6725 Szeged, Moszkvai krt. 9.
E-mail: beszedes@mk.u-szeged.hu

ABSTRACT

At the Department of Process Engineering of the University of Szeged Faculty of Engineering have been investigated the wastewater sludge treatment technologies since over ten years. The main area of the researches is the examination of the effects of thermal pre-treatments on the structural and biochemical changes of different type of sludge. We focused mainly on the deeper analysis of the effects of microwave irradiation (MW) on the change of biodegradability of food industry sludge.

Our experimental results verified that MW pre-treatments have significant effect on the solubility of organic matter, the aerobic and anaerobic degradability of sludge. MW sludge conditioning process needs significantly shorter process time and has stronger disintegration effect than conventional thermal pre-treatments, which resulted in higher biodegradability. Advantages of MW treatment over the conventional sludge conditioning methods prior to anaerobic digestion process has also been manifested in higher biogas yield and reduced lag-phase of anaerobic decomposition. Results of modeling and optimization of MW process show that the irradiated energy and the specific microwave power intensity has also effect on the biodegradability, biogas yield and the energy efficiency, as well.

ÖSSZEFOGLALÁS

A Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Karának Folyamatmérnöki Intézetében, illetve annak jogelődjeiben, körülbelül egy évtizede foglalkozunk szennyvíziszap kezeléssel. Az egyik kiemelt kutatási terület a termikus előkezeléseknek az iszapok szerkezetére, és biológiai-kémiai tulajdonságaira gyakorolt hatásainak vizsgálata. Az Intézetben több évtizede folyó mikrohullámú kutatások eredményeire alapozva, a termikus iszapkezelési eljárásokon belül a mikrohullámú iszapkondicionálás részletes vizsgálatával és elemzésével foglalkozunk.

A kutatásaink egyik fő célkitűzése az intenzív mikrohullámú hőkeltés hatására az iszapban lévő szervesanyagok vízdíszható frakcióiban bekövetkező változásoknak-, továbbá a mikrohullámú előkezeléseknek a biológiai lebonthatóságra gyakorolt hatásainak vizsgálata. A biológiai lebonthatóságban bekövetkező változások jellemzésére az aerob lebomlással arányos biológiai lebonthatósági index paramétert-, az anaerob lebomlás jellemzésére biogáz-rothasztási tesztet alkalmazunk.

Az eddigi eredményeink egyértelműen bizonyították, hogy az élelmiszeripari szennyvíziszapok esetében a mikrohullámú kondicionálási eljárás rövid műveleti idővel alkalmas a szervesanyag-frakció vízdíszhatóságának növelésére, továbbá az aerob és anaerob körülmények közötti biológiai lebonthatóság mértékének fokozására. A mikrohullámú műveleti paraméterek közül mind a fajlagos besugárzott mikrohullámú energia, mind a fajlagos kezelési intenzitás egyaránt befolyásolja a biológiai bonthatóság és a vízdíszhatóság mértékét, és az anaerob fermentációt megelőző kondicionálás esetén mindkét paraméter befolyásolja a kezelések energia-hasznosulási mutatóit.



The project is co-financed by the
European Union

Good neighbours
creating
common future



1. A MIKROHULLÁMÚ ENERGIÁKÖZLÉS, ÉS KÖRNYEZETVÉDELMI ELJÁRÁSOKBAN VALÓ ALKALMAZÁSAI

Az elektromágneses spektrum mikrohullámú tartományával kapcsolatos kutatások és ezek eredményeit összefoglaló közlemények alapvetően két csoportra oszthatók: a mikrohullám hőkeltési (termikus) tulajdonságainak vizsgálata, és a nem-termikus alkalmazásokhoz kapcsolódó eredmények (kommunikáció, hírközlés, egészségügyi alkalmazások és hatások) (Géczi, Sembery, 2005). Mivel a kutatómunkánkban elsősorban a termikus hatások alkalmazásának lehetőségeire fókuszáltunk, ezért az eddigi eredményeket is ehhez a területhez kapcsolódóan foglalom össze. Az összefoglalás célja nem a mikrohullám terjedésének, vagy hőkeltési módjának bemutatása, hanem néhány korai és jelenlegi alkalmazott kutatás eredményeinek rövid bemutatása.

Igaz, hogy a mikrohullámú sugárzással kapcsolatos kutatások, és ezeknek az oktatási anyagokba történő beépítése is több évtizedre nyúlik vissza - gondoljunk csak például a magyar nyelvű Mikrohullámú kézikönyvre (Almássy Gy., Műszaki Könyvkiadó Bp., 1973), amely éppen idén 40 éve került kiadásra – azonban a környezetvédelmi eljárásokban történő alkalmazások kutatása sok évtizedes múlttal még nem rendelkezik. A részben környezetvédelmi vonatkozású, elsősorban a környezetbe kikerülő hulladékok mikrobiális kockázatát csökkentő, egyéb fertőtlenítő eljárásokkal kombinált mikrohullámú kezelések közül meg kell említeni Tata és Beone (1995) egyik korai munkáját, amelyben a kórházi hulladékok oxidációs kezeléséhez kapcsolt mikrohullámú sugárzás kezdeti eredményeiről számolnak be. A gyors és intenzív mikrobaszám csökkentés mellett a mikrohullám más eljárásokkal való kombinálásával (pl.: gőz, ózon, kémiai fertőtlenítőszer), a hulladék térfogatának jelentős mértékű csökkentése is végrehajtható, amely a végleges megsemmisítés, például az égetés, költségeit is csökkenti. A változó elektromágneses tér termikus és atermikus hatásainak részletesebb vizsgálata hazai viszonylatban is kb. két évtizedre tekint vissza. A Nyugat-Magyarországi Egyetem Biológiai Rendszerek Műszaki Intézetének munkatársai többször bizonyították, hogy a mikrohullámú sugárzás az enzimes és egyéb biológiai folyamatokra is hatást gyakorol, amely a csíraszám csökkentési eljárásokon kívül erjesztési folyamatokban és enzimes hidrolízis esetében hasznosítható (Neményi et al., 2008; Lakatos et al., 2010; Lakatos et al., 2012).

Talán a kifejezetten környezetvédelmi technológiákhoz kapcsolódó egyik első mértékadó közlemény a víz- és levegőtisztaság védelemben is alkalmazott aktív szenes adszorberek mikrohullámú regenerálásának kidolgozásával és vizsgálatával foglalkozott (Bradshaw et al., 1998). Fontos megállapítás volt, hogy a regenerálási és aktiválási folyamat gazdaságosságát döntően meghatározta – és a hagyományos módszerekhez képest kedvezőbbé tette - a szén magas dielektromos veszteségi tényezője, amely lehetővé tette, hogy a besugárzott energia kiemelkedően jó hatásfokkal tudja a használt aktív szén-töltetet a szükséges hőmérsékletre hevíteni, és ezáltal a szennyezőanyagokat eltávolítani a felületről. Az eljárás hatékonyságát a későbbiekben anyagszerkezeti szempontok alapján vizsgálva más szerzők megállapították, hogy a jelentősen lerövidülő eljárási-idő mellett a mikrohullámmal regenerált aktív szén adszorpciós tulajdonságai jobbak, mint a hagyományos hevítés esetén (Menendez et al., 1999).



The project is co-financed by the
European Union

Good neighbours
creating
common future 

Az 1970-es évektől kísérleteket végeztek a rádiófrekvenciás sugárzás hatására a talajban bekövetkező változások vizsgálatára. Az alacsony frekvenciájú elektromágneses sugárzást a talajok szennyezőinek eltávolítására alkalmazott stripping eljárások intenzifikálására használták. A nagyteljesítményű mikrohullámú berendezések megjelenésével lehetővé vált a PAH és PCB vegyületekkel, valamint nehézfémekkel szennyezett talajok helyszíni, in situ, remediációja is. A poláris tulajdonságú illékony és normál hevítés hatására kevésbé illékony vegyületek eltávolításában különösen hatékonynak bizonyult a mikrohullámú sugárzás (László et al., 2005). A 2000-es évektől a gyors hevítési eljárásokban alkalmazott mikrohullámú módszert az akkoriban egyre szélesebb körben ismertté váló és egyre többet alkalmazott nanotechnológiával kombinálták. A nagyobb mennyiségben apoláris összetevőket tartalmazó szennyeződések esetében mágneses tulajdonsággal rendelkező nanorészecskék hozzáadása például jelentősen fokozta a mikrohullámú energia elnyelődését, és a nagyságrendekkel felgyorsult felhevülés következtében az eljárás tisztítási kapacitása, valamint hatásfoka is javult (Jones et al., 2002).

A hulladékártalmatlanítási és hasznosítási eljárásokban is sikeresen használták ki a mikrohullám sajátos hőkeltési mechanizmusát. Az energia-intenzív kezelések közül például a pirolízis esetében, a hagyományos hevítéshez képest a mikrohullámú hőkeltés flexibilisebben illeszthető. A veszélyes hulladékok elégetésével szemben a pirolízisnél nem keletkeznek dioxinok és nitrogén-oxidok, és az esetlegesen jelen lévő nehézfém-tartalom a folyamat következtében szilárd széntartalmú reziduumokban marad vissza, és nem szükséges azt a salakból kivonni. A legtöbbször alkalmazott technológiában a kezelés során a minta hőmérséklete a hozzáadott nagy dielektromos veszteségtényezőjú adalékanyagoknak köszönhetően 900-100°C-ig emelkedhet (Menéndez et al., 2005).

Az élelmiszeripari technológiák esetében a keletkező hulladékok legtöbb esetben hasznos, vagy biológiai-, vagy kémiai átalakítást követően hasznosítható, komponensekben gazdagok. A mikrohullámmal intenzifikált kioldást az utóbbi években a magas hőmérsékletű vizes és szerves oldószeres extrakciós módszerek egyik jól használható alternatívája lett (Zhongdong et al., 2006). Az élelmiszeripar lényereségi célzatú préselési eljárásaiban keletkező hulladékból – a préslepenyből- a további kezelést (pl. komposztálást, anaerob fermentációt, vagy alkoholos erjesztést) megelőzően többféle bioaktív vegyület kivonható. A bio-hajtóanyagok előállítása és az ezekhez kapcsolódó kutatás-fejlesztési munka az utóbbi évtizedekben egyre nagyobb hangsúlyt kap hazai viszonylatban is (Kalmár et al., 2010; Nagy és Farkas, 2013). Az Intézetünk kutatócsoportja az Oului Egyetem Környezet- és Folyamatmérnöki Intézetének, valamint a Pannon Egyetem Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatóintézetének munkatársaival kidolgozta a bogyógyümölcsök feldolgozási hulladékaiból történő pektin és antociánok kinyerésére szolgáló mikrohullámmal intenzifikált extrakciós módszert, illetve vizsgáltuk a különböző extrakciós módszerekkel kinyert pektinek gélképző tulajdonságait (Bélafi-Bakó et al., 2012; pap et al., 2012).



The project is co-financed by the
European Union

Good neighbours
creating
common future 

2. A MIKROHULLÁMÚ ISZAPKEZELÉS EDDIGI, HAZAI ÉS NEMZETKÖZI EREDMÉNYEI

A szilárd halmazállapotú szennyezőknél, még a kevert hulladékok, ipari szennyvíziszapok és salakok esetében is, a mikrohullámú energiaközlés a gyorsasága, az elérhető magas hőmérséklet, a szelektív melegítés, a kémiai reakciók lejátszódásának nagyenergiájú aktiválása, a jó kontrollálhatóság és a berendezések mobilitása és relatíve kis mérete miatt költséghatékonyan alkalmazható (Leonelli et al., 2010). Az élelmiszeriparban alkalmazott csíraszám csökkentési célzatú hőkezelések mechanizmusához hasonlóan, a mikrohullámú sugárzás hatására bekövetkező hirtelen hőmérsékletemelkedés következtében az iszapban lévő mikroorganizmusok sejtfalai is felszakadnak (Hong et al., 2004). A biológiai eredetű szennyvíziszapokra jellemző polimer-jellegű, hálószerű szerkezet a vízben oldható vegyületek és a szervesanyag tartalom közrezárásával az iszapot ellenállóvá teszi a biológiai és enzimes lebontásnak. A hálószerű polimer szerkezet a szennyvízből bekerülő mikroorganizmusok extracelluláris anyagcseretermékei és az iszapba kerülő kétértékű kationok által determináltak (Neyens et al., 2004). Tehát a polimerszerű iszapszerkezetnek, a termikus eljárások következtében történő bomlása, ezáltal az iszapot alkotó flokkulumok méretének csökkenése, a szerves anyagok hozzáférhetőbbé válásával, a biológiai bonthatóságot is fokozhatja (Ahn et al., 2009).

A szennyvíztisztítás korszerű technológiái, mint például a membránszűrés, esetében is hulladékként visszamarad az iszap, amelynek kezelése az egyébként hatékony és környezetet kímélő eljárások terjedését nehezíti (Hodúr et al., 2004; László and Hodúr, 2007; Kertész et al., 2011). A szennyvíziszapoknál, amelyek magas víz- és szervesanyag tartalommal rendelkező, élő- és elhalt mikroorganizmusokat tartalmazó többfázisú rendszernek tekinthetők, a mikrohullámú sugárzás a hőmérsékletet intenzíven képes növelni. A mikrohullámú sugárzás energiája nem elegendő az elsőrendű kémiai kötések bontásához, de a makromolekulák esetében a másodrendű- kötésekben bekövetkehetnek változások, amelyek például fehérjék esetében a terciér és kvaterner szerkezetet is befolyásolják (Laurence et al., 2000; Stasta et al., 2006).

A nagyfrekvenciás elektromágneses terekben makromolekulák esetében az elnyelt energia egyes esetekben elegendő egyes oldalláncok polarizálásához, illetve a hidrogénkötések bontásához, amely a térszerkezet módosulásával és a vízdoldhatóság, illetve a biológiai lebonthatóság változását okozza (Bougrier et al., 2006; Eskicioglu et al., 2008). A fehérjék másodlagos, harmadlagos és negyedleges térszerkezetének változása az enzimes folyamatok sebességére is hatással van, amely közvetetten kimutatható például az anaerob fermentációban keletkező biogáz mennyiségének megváltozásával (Banik et al., 2003). A mikrohullámú iszapkondicionálás továbbá előnyösnek tekinthető a víztelenítési eljárások előkezeléseként is. Az iszappehely strukturális változásai nemcsak az egyes összetevők biológiai bonthatóságára hatnak, hanem például előnyösen befolyásolják az ülepedési tulajdonságaikat is (Yu et al., 2010).

A hazai mikrohullámú iszapkezelési kutatások a 2000-es évek elején indultak meg. Többek között foglalkoztak a szennyvíziszap mikrohullámú szárításával és csíraszegényítésével. A baromfiipari szennyvíziszap esetében kapott kísérleti eredmények alapján megfelelő kezelési teljesítmény-program megválasztásával rövid műveleti idővel (néhány perc) az iszap nedvességtartalma a mikrobiális kockázat szempontjából kritikus 8% alá volt csökkenthető, továbbá



The project is co-financed by the
European Union



gyakorlatilag minden vizsgált mikroorganizmus (*Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Coliform ssp.*, összes élő mezofil csíra) tekintetében teljes pusztítást értek el (Ország, Gyarmati, 2003). Megállapították továbbá, hogy a vizet és zsír-olaj fázist is tartalmazó iszapok esetében a mikrohullám fokozza a fázisok szeparálódását (Ország, 2004), ezáltal a műveleti idő, a hagyományos órákig tartó szeparációs eljárásokkal ellentétben, néhány percre volt csökkenthető.

3. A SZTE FOLYAMATMÉRNÖKI INTÉZETÉBEN FOLYÓ MIKROHULLÁMÚ ISZAPKEZELÉSI KUTATÁSOK EREDMÉNYEI

2005-től a SZTE Folyamatmérnöki Intézet Kutatói a gödöllői Szent István Egyetem Környezetipari Rendszerek Intézetével együttműködve vizsgálni kezdte a mikrohullámú kezelésnek a kommunális szennyvíziszapok víztelenítésére és nem-specifikus szervesanyag terhelési paraméterei gyakorolt hatását. A kommunális eredetű, biológiai tisztítási fokozatból származó szennyvíziszapok esetében a szervesanyag tartalmon belül, a mennyiségileg a biokémiai oxigénigény paraméterrel mért, biológiailag lebontható frakciók kismértékű relatív növekedését tapasztaltuk. A kezdeti kedvező eredmények alapján a vizsgálatainkat kiterjesztettük a más szerkezettel és összetétellel rendelkező húsipari szennyvízből származó primer iszapra. Az eredményeink alapján látható volt, hogy mind kommunális, mind élelmiszeripari eredetű szennyvíziszapok esetében a mikrohullámú kezelés hatására a szervesanyag biológiailag lebontható részarányával korreláló biokémiai oxigénigény paraméter értéke növekedett. A biológiai bonthatóság növekedése egyes kísérletek esetében biogáz-fermentációs vizsgálatokkal alátámasztható volt (Beszédes et al., 2007). A szennyvíz „erősségének” jellemzésére a hazai szakirodalom által használt KOI/BOI arány tekintetében azonban anomáliák adódtak. Az összegparaméterekből képzett hányados, a kémiai oxigénigény (KOI) értéke standard mérési módszerrel történő meghatározása esetén egyértelmű trendet nem mutatott, ami a gyakorlati tapasztalatokkal és az egyéb tesztek eredményeivel nem állt összhangban.

Az Intézetünk kutatócsoportja a Környezet- és Nanotechnológiai Regionális Egyetemi Tudásközpont (KNRET): a dél-alföldi régió életminőségét javító integrált rendszerek fejlesztése” program Környezettechnológia Alprogramja segítségével lehetőséget kapott a mikrohullámú szennyvíziszap kezelési vizsgálatok folytatására és kiterjesztésére. A kísérleteinket élelmiszeripari, ezen belül húsipari és tejipari technológiákban keletkező, szennyvizek iszapfázisával végeztük. A szakirodalmi közleményekben az iszap szervesanyag frakciójában a termikus kezelések hatására végbemenő változás jellemzését a kémiai oxigénigény (KOI vagy COD) mérésre vezették vissza, nagy-hígítású iszapmintákból végezve az analízist. Az eredmények adott alanyag esetében a kezelés hatására az iszap szerkezetében történő változást jelezték, azonban a különböző típusú iszapok - illetve például eltérő kezdeti paraméterekkel rendelkező minták - esetében az eredmények nehezen összehasonlíthatóak. Egyes szerzők a vízzoldható fázisból mérhető COD (sCOD) paraméter értékeit közölték, mások különböző arányokat a nem vízzoldható fázis tulajdonságainak (pCOD) vagy a lúgos kémhatáson végzett termikus roncsolással meghatározható maximális vízzoldható COD (sCOD_{max}) felhasználásával.



The project is co-financed by the
European Union

Good neighbours
creating
common future



Ezért a munkánk során először definiáltuk az ún. százalékos szervesanyag oldhatóságot (S_{OM}) (1), amely az iszap kezdeti paramétereitől függetlenül jelzi az adott kezelés esetében a szervesanyag frakcióban végbemenő változásokat.

$$S_{OM} = \frac{\frac{sCOD}{pCOD} - \frac{sCOD_{kezd}}{pCOD_{kezd}}}{\frac{sCOD_{max}}{pCOD_{min}}} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

A mikrohullámú előkezeléseknek a biológiai lebonthatóságára gyakorolt hatásainak vizsgálata esetében, a vízdoldhatóság esetében leírt problémák szintén jellemzőek voltak. A szervesanyag vízdoldhatósági index paraméterhez hasonlóan definiáltuk a százalékos biodegradálhatóságot (BD), amelyet a teljes mintából és ennek vízdoldható frakciójából történő kémiai oxigénigény mérésre (tCOD, illetve sCOD), valamint az öt napos biokémiai oxigénigény (BOI5) meghatározására vezettük vissza (2).

$$BD = \frac{\frac{BOD_5}{tCOD} - \frac{BOD_{5,kezd}}{tCOD_{kezd}}}{\frac{BOD_{5,max}}{sCOD_{max}}} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

A fentieken kívül a mikrohullámú iszapkondicionálási eljárás hatékonyságának vizsgálata során kontrollparaméterként használtuk a mezofil hőmérséklettartományú anaerob fermentációs folyamatban képződő fajlagos biogáz kitermelési mutatót, valamint a bio-gázkeverék metántartalmát és az anaerob lebomlás ütemét.

A mikrohullámú kezelési eljárások alkalmazása során a vonatkozó szakirodalmak arról számolnak be, hogy a vizsgált és optimált műveleti paraméterek legtöbb esetben: a kezelési teljesítmény, a kezelési idő, valamint egyes eljárások esetében a szakaszos besugárzási-megszakítási idő ütemezése. A kísérleti munka során az iszapkondicionálási eljárás esetében a fajlagos (tömegegységre vonatkoztatott) mikrohullámú teljesítmény (MWPL) (3) és a teljes kezelési időre vonatkoztatott, ugyancsak fajlagos mikrohullámú energiaközlés (IMWE) (4) hatását vizsgáltuk a biológiai lebonthatóságra vonatkozóan.

$$MWPL = \frac{P_{magnetron}}{m_{min\ ta}} \quad [Wg^{-1}] \quad (3)$$

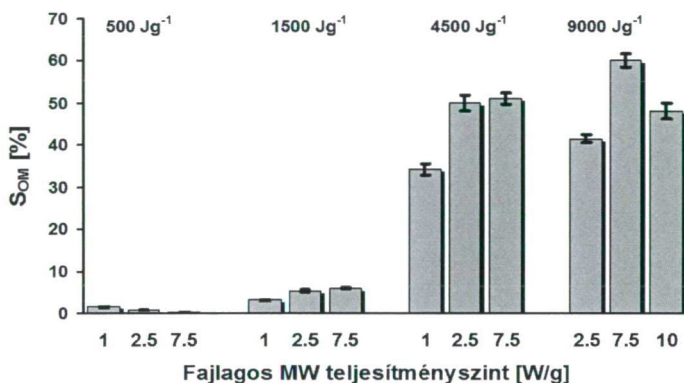
$$IMWE = \frac{P_{magnetron} \times \tau \times I}{100 \times m_{min\ ta}} \quad [Jg^{-1}] \quad (4)$$



The project is co-financed by the
European Union

Good neighbours
creating
common future 

A mikrohullámú energiaközlésnek a szervesanyag vízdíhatóságára gyakorolt intenzív, a hagyományos hőkezelésnél erőteljesebb, hatása biológiai tisztításból származó kommunális fölösiszapok esetében már igazolt (Ahn et al., 2009; Yu et al., 2010), azonban élelmiszeripari eredetű primer iszapok esetében még nem vizsgált. A saját vizsgálataink során a 2,5 és 7,5 W/g fajlagos MW intenzitás esetén a pCOD/sCOD arány elérte, illetve meghaladta az 1 értéket, vagyis a szervesanyagok több mint 50%-a vízdíhatóvá vált (Beszedes et al., 2011). A százalékos szervesanyag oldhatóság értékét tekintve látható, hogy az 500 Jg⁻¹ közölt energiamennyiség nem volt lényegi hatással a szennyvíziszap komponenseinek oldhatóságára (1. ábra). Az 1500 Jg⁻¹ és 4500 Jg⁻¹ energiamennyiségek esetén a fajlagos mikrohullámú intenzitás növelése fokozta a szervesanyagok vízdíhatóságát, 4500 Jg⁻¹ esetén azonban a 2,5 Wg⁻¹ intenzitású előkezeléshez képest a 7,5 Wg⁻¹ kezelés további szignifikáns növekedést nem okozott.



1. ábra. A szervesanyagok vízdíhatóságának százalékos változásai (S_{OM}) a besugárzott fajlagos mikrohullámú energia [Jg⁻¹] és a fajlagos mikrohullámú teljesítményszint [W/g] függvényében

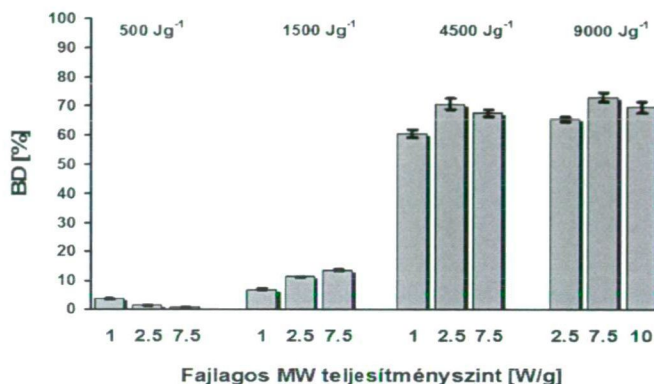
A legmagasabb vizsgált energia (9000 Jg⁻¹) esetén a MW kezelés intenzitásának növelése 2,5-ről 7,5 Wg⁻¹-ra növelte a vízdíhatósági index értékét, a 10 Wg⁻¹ kezelése esetében azonban a vízdíhatósági index már szignifikánsan csökkent (1. ábra). Az eredmények alapján látható, hogy a mikrohullámú előkezelés előnyösen hat a szennyvíziszapban lévő szerves anyagok vízdíhatóságára, a növekmény mértéke az alkalmazott mikrohullámú intenzitástól (MWPL) és a kezelési időtől függő besugárzott energia mennyiségétől (IMWE) egyaránt függ, azonban a maximálisan elérhető oldékonyság értéke korlátozott.

A biodegradálhatósági index mikrohullámú kezelést követő változásait tekintve a vízdíhatóság vizsgálatánál leírt eredményekhez hasonló tendencia volt tapasztalható.



The project is co-financed by the European Union

Good neighbours
creating
common future



2. ábra. A biológiai bomthatóság százalékos változásai (BD) a besugárzott fajlagos mikrohullámú energia [Jg^{-1}] és a fajlagos mikrohullámú teljesítmény [W/g] függvényében

A biológiai bomthatóság esetében azonban a 4500 és 9000 Jg^{-1} közötti energiamennyiségek esetében is tapasztalható volt a magasabb fajlagos MW teljesítményszintek esetén a negatív hatás, azonban ennek mértéke kisebb volt, mint az oldhatóság csökkenése esetén (2. ábra). Összességében azonban a mikrohullámú előkezelések alkalmasnak bizonyultak a tejipari szennyvíziszap biológiai lebomthatóságának növelésére, az elméleti maximális értéknek akár 60%-a is elérhető volt a műveleti paraméterek megfelelő megválasztásával.

A mikrohullámú iszapkondicionálási eljárások esetében – például a mikrohullámú extrakciótól eltérően- nagyszámú szakirodalmi közlemény nem áll rendelkezésre, amelyek a kezelési körülmények optimalizálásával foglalkoznak. A saját kísérleteinkben az előzetes vizsgálati eredmények alapján a mikrohullámú iszapkezelés paramétereit közül a következőket vizsgáltuk:

- a mintával közölt energia (IMWE) 3000-1200 Jg^{-1} tartományban
- a fajlagos mikrohullámú teljesítményszint (MWPL) 2-7,5 Wg^{-1} tartományban

A paraméterek hatásának szignifikanciáját a MODDE 8.0 kísérlettervező és értékelő szoftverrel végeztük, az optimalizáláshoz válaszfelület elemzési módszert (RSM) alkalmaztunk. A kísérlettervezést kompozit kísérletterv alapján végeztük többszörös lineáris regressziót (MLR) alkalmazva. Az előzetes vizsgálat eredményei alapján a szennyvíziszap vízdoldhatóságát [1] a vizsgált változók közül fajlagos mikrohullámú teljesítményszint és a közölt energia nagysága; a biológiai lebomthatóság változását [2] az előzőekben felsorolt paramétereken kívül azok interakciója befolyásolta szignifikánsan. Az elemzés eredményei alapján a nem-szignifikáns tagokat eltávolítva a regresszió analízist újra elvégeztük, amely a következő egyenleteket eredményezte:

$$S = 45,649 + 7,967 X_1 - 13,6979 X_1^2 + 3,9975 X_2^2 \quad [\%] \quad [1]$$

$$BD = 55,2557 + 10,079 X_1 + 2,356 X_1 X_2 - 20,9787 X_1^2 - 2,77125 X_2^2 \quad [\%] \quad [2]$$

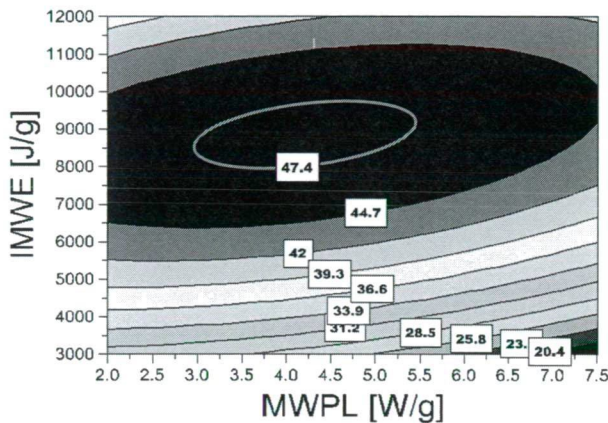
ahol IMWE= X_1 [Jg^{-1}] és MWPL= X_2 [Wg^{-1}].



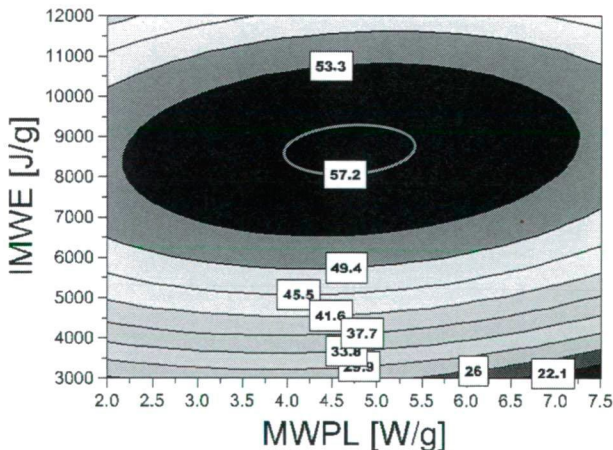
The project is co-financed by the
European Union

Good neighbours
creating
common future 

Az alkotott modellek a szoros illeszkedés miatt jól alkalmazhatónak bizonyultak (R^2 értéke mindkét esetben 0,9 feletti). Az alkotott matematikai modell alapján generált válaszfelületek két dimenziós metszeteit a 3.a. és 3.b. ábrák mutatják.



a.



b.

3. ábra. Vízoldhatóság- (a) és a biológiai lebonthatóság változást (b) bemutató válaszfelület-metszetek a besugárzott fajlagos mikrohullámú energia [Jg^{-1}] és a fajlagos mikrohullámú teljesítmény [W/g] függvényében

A szervesanyagok vízoldhatóságának maximális értéke a 3-5,5 Wg^{-1} fajlagos MW kezelési intenzitás és 7500-9500 Jg^{-1} közötti energia tartományok között érhető el. A kezelési paraméterek



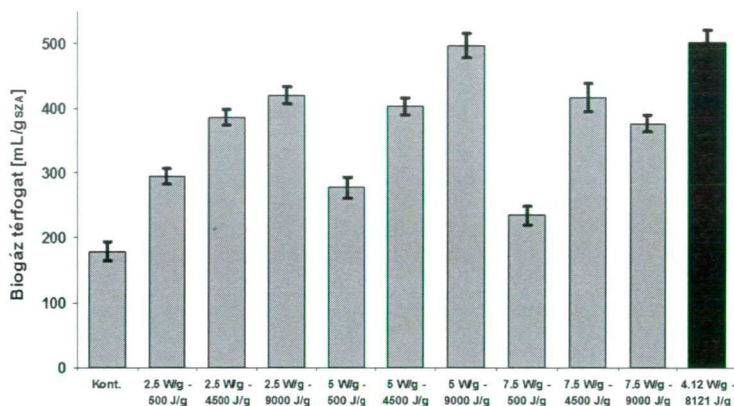
The project is co-financed by the
European Union

Good neighbours
creating
common future

optimális tartományai a biológiai lebonthatóság esetében 8000-9000 Jg⁻¹, illetve 4-5,5 Wg⁻¹ fajlagos intenzitás esetén adódtak.

A mikrohullámú kezelési paramétereket optimalizálásánál a legmagasabb biológiai lebonthatóság elérését tűztük ki célul a legkisebb energiafelhasználással, ennek értelmében a két vizsgált kontrollparaméter változásait figyelembe véve, az optimális kezelési paraméter-tartomány 4,0-4,2 Wg⁻¹ fajlagos MW intenzitás és 8000-8200 Jg⁻¹ között energia értékek között adódik.

A 2,5 W/g és az 5W/g fajlagos MW teljesítményszintek esetében a vizsgált tartományon belül, a besugárzott mikrohullámú energia növelése fokozta a termelődő biogáz mennyiségét, azonban 7,5 W/g fajlagos kezelési intenzitás esetén a besugárzott energia 4500 J/g-ról 9000 J/g értékre növelése a biogázkitermelést kb. 10%-al csökkentette. A változások tendenciája tehát a biológiai lebonthatóság esetében tapasztaltakhoz hasonló volt.



4. ábra. 30 napos mezofil rothasztás során keletkező fajlagos kumulált biogáztérfogatok

A saját eredményeinknek, az eddig szakirodalomban közölt eredményekkel való összevetése nehézkes, mivel a mikrohullámú kondicionálási módszert élelmiszeripari szennyvíziszapok esetében még kevésbé vizsgálták. A döntően kommunális eredetű szennyvíziszapokra vonatkozó eredményekkel összevetve (Park et al., 2004; Bougrier et al., 2008; Eskicioglu et al., 2007) azonban megállapítható, hogy a változások tendenciája azonos. A besugárzott energia megnövelt mennyisége fokozza a biogáz produktumot, azonban a pozitív hatás korlátozott.

Egy meghatározott, az alapanyagtól függő, érték átlépése után az anaerob fermentáció hatékonysága romlik. Vagyis az elvégzett vizsgálatok eredményei az anaerob fermentáció esetében szintén alátámasztották, hogy a besugárzott energia mennyiségén túl a fajlagos teljesítményszint (intenzitás) szignifikánsan befolyásolja a kezelések hatékonyságát (Beszédes et al., 2011b).

Alacsony szárazanyag tartalmú szennyvíziszapok termikus előkezelési eljárásai esetében a biológiai lebonthatóság és a biogáz termelődés tekintetében kisebb növekmény volt tapasztalható,



The project is co-financed by the
European Union

Good neighbours
creating
common future



továbbá a mikrohullámú és a hagyományos hőkezelés között, a hatásuk mértékének figyelembevételével, egyértelmű különbség nem tehető (Géczi et al., 2012; Beszédes et al., 2012).

A biológiai lebonthatóság esetében meghatározott optimális mikrohullámú kezelési paraméterek alkalmazásával előkezelt iszapot is rothasztottuk. A 4. számú ábrán jelzett eredmény azt mutatja, hogy a vizsgálatokhoz használt iszap esetében a meghatározott optimum paraméterek az anaerob fermentáció esetében is jó eredményeket hoztak. A 4,12W/g intenzitás mellett közölt 8121 J/g fajlagos energiaérték alkalmazásával azonos biogázkitermelés (kb. 500 mL/g) volt elérhető, mint az 5W/g intenzitás és 900 J/g közölt energia értékek mellett, azonban az alacsonyabb intenzitás és kisebb energiaszükséglet energetikai szempontokból előnyösebb.

4. AZ EDDIGI MUNKA ÖSSZEFOGLALÁSA ÉS A TOVÁBBI LEHETŐSÉGEK

A mérési eredményeink azt mutatták, hogy a mikrohullámú energiaközlés élelmiszeripari eredetű elővíztelenített primer szennyvíziszap esetében növelte a szervesanyagok vízdoldhatóságát és a biológiai lebonthatóságát. Már a rövid idejű mikrohullámú előkezelések is alkalmasak lehetnek - az egyéb termikus eljárásokhoz képest nagyobb mértékű - biológiai lebonthatóság növelésére

Megállapítottuk, hogy a vizsgált iszap esetében és az alkalmazott kezelési körülmények között a kémiai módszerrel mérhető szervesanyag-oldhatóság és a biokémiai oxigénigény mérésre visszavezetett biológiai lebonthatóság között lineáris összefüggés van. A tejipari szennyvíziszap esetében a szervesanyag-frakció kezdeti kb. 9%-os vízdoldhatóságát megfelelő mikrohullámú előkezeléssel kb. 58%-ra, a szervesanyag tartalom belül a biológiailag oxidálható frakciók mennyiségét a kezdeti 8%-ról 55% fölé lehetett növelni.

A kísérlettervezésen, és az alkotott matematikai modellen alapuló válaszfelület elemzés eredményei a kísérleti eredményekkel jó egyezést mutattak. Mind a vízdoldhatóság, mind a biokémiai oxigénigényből számítható biológiai lebonthatóság értékeit tekintve azt tapasztaltuk, hogy a besugárzott mikrohullámú energia és a fajlagos mikrohullámú teljesítményszint egyaránt meghatározó műveleti paraméter.

Az eddig elvégzett elő-kísérletek alapján az anaerob lebontást tekintve bizonyítható, hogy a szervesanyag vízdoldhatóságának növekedése és az iszapstruktúra megváltozása következtében a szervesanyag frakció feltáródása a kumulált biogáz produktum növekedését okozza, továbbá az anaerob lebontás üteme is fokozódik.

Összességében tehát megállapítottuk, hogy a mikrohullámú iszapkondicionálási módszer adaptálható az élelmiszeripari szennyvíziszap kezelési eljárásokba, mert mind a későbbi aerob, mind az anaerob biológiai hasznosítás esetében előnyösnek mutatkozott. A kezelések következtében az iszap szervesanyag tartalmának oldhatóságában és ezáltal a mikroorganizmusoknak a szubsztrát felhasználásában bekövetkező pozitív változások az iszapok talajerő utánpótlásra való hasznosítása és a bioenergetikai hasznosítása esetében is hatékonyságnövelő tényező, továbbá a biotranszformációs folyamatokban visszamaradó hulladék szervesanyag tartalmának csökkenésével, azok környezetterhelő hatása is csökkenthető.



The project is co-financed by the
European Union



A kutatási munkánk következő szakaszában egyrészt a léptéknövelés igényének megfelelően, másrészt valós ipari technológiában alkalmazható mikrohullámú kezelőberendezést modellezve, egy folyamatos anyagtovábbítású mikrohullámú kezelőrendszert terveztünk és üzemeltünk be. A berendezés 700W beépített teljesítményű, 2,45 GHz frekvencián működő vízhűtéses magnetronot tartalmaz.

A berendezés alkalmas nagy viszkozitású élelmiszeripari szennyvíziszapok fermentációt megelőző kezelésére $0,5-1,5 \text{ Wg}^{-1}$ fajlagos mikrohullámú teljesítményszint tartományban, a folyamat szabályozhatóságát pedig a kifejlesztett a mérő-adatgyűjtő rendszer biztosítja. A mikrohullámú térben a kezelendő anyag egy teflon alapanyagból készült csőspirált tartalmazó toroid-üregrezonátoron áramlik keresztül. Az anyagmozgatást hidraulikus munkahenger végzi. A kezelési folyamat közben a hőmérsékletváltozásnak a dielektromos paraméterekre gyakorolt hatásainak vizsgálata a mérőrendszerbe épített, saját fejlesztésű dielektrométerrel végezhető.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton is szeretnék köszönetet mondani Keszthelyi-Szabó Gábor Professzor Úrnak, aki 2002-ben lehetővé tette, hogy a mikrohullámú kutatócsoportjának munkájába bekapcsolódjak és a munkámat azóta is ehhez a csoporthoz tartozva, az Ő szakmai irányítása mellett végezhetem.

Továbbá köszönetemet fejezem ki Hodúr Cecilia Professzor Asszonynak és László Zsuzsanna Docens Asszonynak, akik a munkám kezdete óta folyamatosan, a kutatói tapasztalatukkal, valamint a kísérleti munka feltételeinek biztosításával lehetővé teszik, hogy a munkánk eredményes lehet.

Külön köszönettel tartozom Ludányi Lajos főiskolai tanárnak, aki több mint tíz éve segítséget nyújt a mikrohullámok világának megértéshez és a kutatócsoportunk sikerességéhez nemcsak elméleti tudásával, hanem készülék-tervezői tapasztalatával is hozzájárul. A mikrohullámú kutatócsoport legújabb tagjának, Kovács Róbertné Veszeloovszki Petrának szintén köszönetemet fejezem ki, a folyamatos anyagtovábbítású mikrohullámú kezelőberendezés beüzemelése és az elkezdett munka folytatása és kiterjesztése miatt. Hálámat fejezem ki továbbá a SZTE MK Folyamatmérnöki Intézet minden kollégájának, akik az évek alatt a kísérleti munka támogatásával, az adatok feldolgozával-elemzésével a segítségünkre szolgáltak.

A társintézmények részéről a bemutatott kutatás, illetve az egyéb mikrohullámú kutatásokban való együttműködés miatt köszönetünket fejezzük ki Géczi Gábor Docens Úrnak (SZIE GÉK), Neményi Miklós Akadémikus Úrnak, Kovács Attila József Professzor Úrnak és Lakatos Erika Adjunktus Asszonynak (NYME MTK), Bélaifiné Bakó Katalin Professzorasszonynak és kutatócsoportjának (Veszprémi Egyetem) továbbá Pap Nóra tudományos munkatársnak és kollégáinak (Oului Egyetem), akik ötleteikkel és a közös projektekben végzett munkájukkal hozzájárultak a kutatócsoportunk sikerességéhez.

Végül, de nem utolsósorban, köszönet illeti azokat a jelenlegi és volt hallgatóinkat, akik a kutatócsoportunkban végzett szakdolgozati és tudományos diákköri tevékenységükkel munkánkat segítették.



The project is co-financed by the
European Union



A szerzők, és a kutatócsoport köszönetét fejezi ki az OTKA K105021 számú "Biológiai rendszerek kombinált membrán szeparációjának és a koncentrátum mikrohullámú utókezelésének modellezése" című pályázat nyújtotta támogatásért.

REFERENCIÁK

1. Ahn JH., Shin SG., Hwang S. (2009): Effect of microwave irradiation on the disintegration and acidogenesis of municipal secondary sludge. *Chemical Engineering Journal Vol. 153(1-3)*, pp. 145-150
2. Almássy Gy. (1973): Mikrohullámú kézikönyv. *Műszaki Könyvkiadó, Budapest*, 985 p.
3. Bélafi-Bakó K, Cserjési P, Beszédes S, Csanádi Z, Hodúr C. (2012): Berry Pectins Microwave-Assisted Extraction and Rheological Properties. *Food And Bioprocess Technology, Vol. 5*, pp.: 1100-1105.
4. Beszédes S., Géczi G., László Zs., Hodúr C., Szabó G (2007): Sewage sludge treatment by microwave energy. *Review of Faculty of Engineering 2007*, pp.11-17.
5. Beszédes S., László Zs., Horváth Zs. H., Szabó G., Hodúr C. (2011) Comparison of the effects of microwave irradiation with different intensities on the biodegradability of sludge from the dairy- and meat-industry. *Bioresource Technology, Vol. 102*, pp. 814-821.
6. Beszédes S., Marietta Ábel, Zsuzsanna László, Gábor Szabó, Cecilia Hodúr (2011): Application of response surface methodology to optimize microwave sludge conditioning for enhanced biogas production. *International Journal of Engineering -Annals of Faculty of Engineering Hunedoara. Vol.9(2), 2011*, pp.: 189-193.
7. Beszédes S., Gábor Szabó, Gábor Géczi (2012): Application of thermal and microwave pre-treatments for dairy wastewater sludge. *Annals of Faculty Of Engineering Hunedoara-International Journal Of Engineering Vol. 10(3), 2012*, pp. 231-235.
8. Bougrier, C., Delgenes J. P., Carrere H. (2006): Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield. *Process Safety and Enironmental Protection 84(B4)*,pp.: 280-284.
9. Bougrier, C., Delgenes J. P., Carrere H. (2008), Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal Vol. 139 (2)* pp. 236-244.
10. Banik S., Bandyopadhyay S., Ganguly S. (2003): Bioeffects of microwave –a bireif review. *Bioresource Technology Vol. 87*. pp.: 155-159
11. Bradshaw SM., VanWyk EJ., Swardt JB. (1998): Microwave heating principles and the application to the regenartion of granular activated carbon. *Journal of the South African Mining and Metallurgy Institute Vol. 98(4)*. pp.: 201-210



The project is co-financed by the
European Union

Good neighbours
creating
common future



12. Eskicioglu, C., Terzian N., Kennedy K., J., Droste, R., L., Hamoda M. (2007): Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge. *Water Research*, Vol. 41, pp. 2457- 2466.
13. Eskicioglu, C., Prorot, A., Marin, J., Droste R.L., Kennedy, K.J. (2008): Synergetic pretreatment of sewage sludge by microwave irradiation in presence of H₂O₂ for enhanced anaerobic digestion. *Water Research* 42, 4674- 4682.
14. Géczi G., Sembery P. (2005): Mikrohullám az élelmiszeriparban. *Áram és technológia*, 2005, pp. 19-21
15. Géczi G., Beszédes S., Szabó G. (2012): Élelmiszeripari szennyvizek biológiai lebonthatóságának növelése termikus előkezelésekkel *Mezőgazdasági Technika* 53:(3) pp. 2-4.
16. Hodúr, C., László, Zs. (2004): Minimal Processing in Waste Water Treatment. *Annale of University of Arad, Chemistry and Environmental Protection*, 2004. pp.:271-277.
17. Hong, M., Park, J. K., Lee, Y. O. (2004): Mechanisms of microwave irradiation involved in the destruction of fecal coliforms from biosolids. *Water Research*, Vol. 38, pp. 1615-1625.
18. Jones, D. A., Lelyveld, T. P., Mavrofidis, S. D., Kingman, S. W., Miles, N. J. (2002): Microwave heating applications in environmental engineering. *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 75-90
19. Kalmár I., Kalmár V.E., Farkas F., Nagy V. (2010): Energy naturally - biogas and biodiesel. *Review Of Faculty of Engineering Analecta Technica Szegedinsia*, 2010 (2-3), pp.: 122-127.
20. Kertész S, László Z, Forgács E, Szabó G, Hodúr C (2011): Dairy wastewater purification by vibratory shear enhanced processing. *Desalination and Water Treatment* 35:(1-3) pp. 195-201.
21. Lakatos E, Kovács A J, Végvári Gy, Neményi M. (2010): Mikrohullámú sugárzás hatása a fogyasztói tejben lévő lipáz és xantin-oxidáz enzimek működésére. *Magyar Állatorvosok Lapja* 132:(12) pp. 728-734.
22. Lakatos Erika, Kovács Attila J, Kapcsándi Viktória, Neményi Miklós (2012): Alacsony teljesítményű mikrohullámú sugárzás hatása a cellobiáz enzim működésére. *Acta Agronomica Óváriensis* 54:(1) pp. 3-11.
23. László Zs., Simon E., Hodúr C., Fenyvessy J. (2005): A mikrohullámú technika alkalmazásának újabb lehetőségei az élelmiszer- és környezetiparban. *DE Agrártudományi Közlemények* 2005/18 pp. 29-34
24. László Zs., Hodúr C. (2007): Purification of thermal wastewater by membrane separation and ozonation. *Desalination* 2007:206(1-3), pp. 333-340.
25. Laurence JA., French PW., Lindner RA, McKenzie DR. (2000): Biological effects of Electromagnetic Fields-Mechanisms for the Effects of Pulsed Microwave Radiation on Protein Conformation. *Journal of theoretical Biology*. 2000:206, pp.: 291-298
26. Leonelli C., Mason T.J. (2010): Microwave and ultrasonic processing: Now a realistic option for industry. *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 49, pp. 885-900.



The project is co-financed by the
European Union

Good neighbours
creating
common future 

27. Menendez JA., Menedez EM., Garcia A., Parra JB., Pis JJ. (1999): Thermal Treatment of Active Carbons: a comparison between microwave and electric heating. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* Vol. 34(3), pp.:137-143
28. Menéndez, J. A., Dominguez, M., Inganzo, M., Pis, I.I. (2005): Microwave-induced drying, pyrolysis and gasification of sewage sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2005:74, pp.:406-412.
29. Nagy F., Farkas F. (2013): Emission testing used biogas and vegetable oils as fuels. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, 2013:6(1); pp. 129-132.
30. Neményi, M., Lakatos, E., Kovács, A., Szerencsi, Á. (2008): The effect of microwave treatment on cellulase enzyme activity. *Abstracts of EurAgEng-International Conference on Agricultural Engineering*, 2008. 6 p., (CDROM)
31. Neyens E., Baeyens J., Dewil R., DeHeyder, B. (2004): Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering. . *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 106B, pp. 83-92.
32. Ország I. (2004): Baromfifeldolgozási szennyvíziszap környezeti ártalmának megszüntetése mikrohullámú energiaközléssel. *Műszaki Kémiai Napok Konferencia kiadvány (2004)*, Veszprém, pp. 117-122.
33. Ország I., Gyarmati L. (2003): A mikrohullámú energiaközlés hatása szennyvíziszapokra, a baromfifeldolgozási szennyvíziszap dielektromos jellemzőinek meghatározása. *Műszaki Kémiai Napok Konferencia kiadvány (2003)*, Veszprém, pp.: 123-128.
34. Nora Pap, Sándor Beszédes , Eva Pongrácz , Liisa Myllykoski , Miklòsnè Gábor , Ernő Gyimes , Cecilia Hodúr , Riitta L. Keiski (2012): Microwave-Assisted Extraction of Anthocyanins from Black Currant Marc. *Food And Bioprocess Technology*, In press, DOI 10.1007/s11947-012-0964-9
35. Park, B., Ahn, J.H., Kim, J., Hwang, S. (2004): Use of microwave pretreatment for enhanced anaerobiosis of secondary sludge. *Water Science and Technology*. 50 (9), pp.: 17-23.
36. Stasta, P., Boran, J., Bebar, L., Stehlik, P., Oral, J. (2006): Thermal processing of sewage sludge. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 1420-1426



The project is co-financed by the
European Union

